

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА

К.В. Алсараева, В.Е. Громов, С.В. Коновалов

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
ул. Кирова, 42, Новокузнецк, 654007, Россия,

gromov@physics.sibsiu.ru alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru, konovalov@physics.sibsiu.ru

Сплавы алюминия с кремнием, обладая высокими удельными механическими свойствами, являются хрупким, трудно деформируемым материалом. Для расширения областей применения этих сплавов в промышленности необходимо существенно улучшить их структуру и повысить пластические свойства. Осуществлена обработка силумина эвтектического состава высокоинтенсивным импульсным электронным пучком и выявлено кратное увеличение усталостной долговечности материала. Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры модифицированного слоя и поверхности разрушения силумина, подвергнутого многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения. Анализ структуры поверхностного слоя позволил выявить источники зарождения субмикротрещин. Выявлено, что наиболее опасными концентраторами напряжений являются крупные пластины кремния, расположенные на поверхности и в приповерхностных слоях. Выявлены и проанализированы факторы, ответственные за увеличение его усталостной долговечности.

Введение

Одной из наиболее часто встречающихся причин выхода из строя оборудования, механизмов, машин и сооружений является усталостное разрушение деталей. Поэтому проблема предотвращения усталостных разрушений ответственных деталей и, соответственно, увеличения срока их службы является достаточно актуальной. Существенное влияние на усталостную долговечность материалов, в том числе и силумина, оказывает состояние поверхностного слоя, так как усталостные трещины, как известно, зарождаются именно в приповерхностном слое детали [1].

Применение методов поверхностного упрочнения приводит в ряде случаев к значительному повышению пределов выносливости (в 2–3 раза и более), что связано с удалением микронеровностей от механической обработки, формированием в поверхностном слое упрочненной детали сжимающих остаточных напряжений, диспергированием структуры матрицы и включений вторых фаз [2]. Эффективным методом указанной модификации и, как следствие, повышения усталостного ресурса [3, 4] является обработка поверхности материала высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия, позволяющая изменять структуру поверхностного слоя толщиной в десятки микрон.

Целью настоящей работы являлось исследование структурно-фазовых состояний поверхностного слоя силумина АК12, модифицированного высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия и подвергнутого последующим многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения.

Усталостные испытания, как и в [3, 4], проводили на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба. Образцы облучались высокоинтенсивным электронным пучком на установке «СОЛО» при следующих параметрах: энергия электронов 16 кэВ; частота следования импульсов 0.3 с^{-1} ; длительность импульса пучка электронов 50 мкс и 150 мкс; плотность энергии пучка электронов $10\text{--}25 \text{ Дж/см}^2$; количество импульсов воздействия 1, 3,

5. Облучали лицевую поверхность образцов, т.е. поверхность образца, находящуюся над надрезом, имитирующим трещину. На каждый режим облучения испытывали не менее 5 образцов.

Результаты исследования

Проведенные усталостные испытания образцов силумина выявили немонотонную зависимость количества циклов до разрушения от режима облучения высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (рис. 1). Наибольшее увеличение усталостной долговечности (~3.5 раза) обеспечивал режим облучения № 4 с параметрами: $E_s=20 \text{ Дж/см}^2$; длительность импульса воздействия 150 мкс; число импульсов – 5.

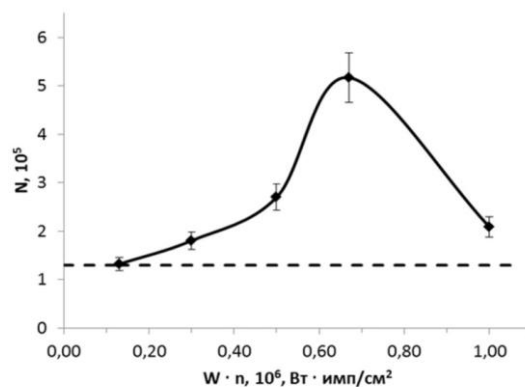


Рис. 1. Зависимость среднего числа циклов до разрушения N от произведения плотности мощности W_s на количество импульсов воздействия пучка электронов n . Пунктирной линией указаны значения усталостной долговечности исходного материала.

Структура эвтектического силумина в исходном состоянии содержит алюмо-кремниевую эвтектику, в которой частицы кремния располагаются хаотически и имеют преимущественно пластинчатую форму с размерами от единиц до десятков микрон. Проанализируем структуру образцов, облученных в режимах, приводящих к незначительному (режим № 2: 15 Дж/см^2 ; 150 мкс;

3 имп.) и существенному (режим № 4: 20 Дж/см²; 150 мкс; 5 имп.) увеличению усталостной долговечности после усталостных испытаний (рис. 2).

Обработка поверхности силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком (режим № 2) приводит лишь к частичному оплавлению включений избыточного кремния (рис. 2а) и сопровождается формированием в поверхностном слое микропор и микротрещин, ослабляющих материал. Пластины кремния являются концентраторами напряжений, и в результате усталостные испытания приводят к разрушению пластин и формированию протяженных микротрещин, ослабляющих материал (рис. 2б). Это является определяющим фактором, способствующим незначительному повышению (см. рис. 1) усталостной долговечности материала.

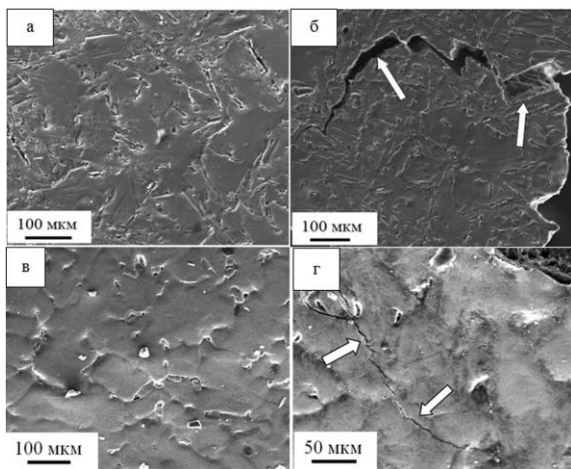


Рис. 2. Структура поверхности силумина, обработанного электронным пучком по режимам № 2 (а, б) и № 4 (в, г); Стрелками на (б) и (г) указана трещины, сформировавшиеся при усталостных испытаниях.

После облучения образцов силумина по режиму № 4 (рис. 2в, г) концентраторы напряжений, способные являться источниками разрушения образца, на кромке излома не обнаруживаются. Трещины, параллельные поверхности разрушения, располагаются на некотором удалении от нее (рис. 2г). Это, очевидно, указывает на то, что концентратор, явившийся причиной разрушения образца, располагался под поверхностью, по всей видимости, на границе раздела жидкой и твердой фаз. Отчетливо видно измельчение структуры данного образца по сравнению с предыдущим. При облучении поверхности силумина электронным пучком по данному режиму плавится поверхностный слой толщиной не менее 20 мкм. Высокоскоростная кристаллизация приводит к формированию структуры, размеры кристаллитов которой изменяются в пределах от 250 нм до 100 нм. Очевидно, формирование подобной наноразмерной структуры и является определяющей причиной, способствующей многократному увеличению усталостной долговечности силумина.

На поверхности разрушения выявляются три характерные зоны — зона усталостного роста трещины, зона долома и разделяющая их зона

ускоренного роста трещины [5]. Характерное изображение поверхности разрушения образцов силумина, разрушенных после облучения по режимам № 2 и № 4, представлено на рис. 3. Ширина зоны усталостного роста трещины [5] в исследуемых образцах силумина зависит от режима облучения материала электронным пучком. Выполненные исследования показали, что толщина зоны усталостного роста трещины в образце, разрушенном после облучения по режиму № 2, составляет 0,96 мм, а в образце, разрушенном после облучения по режиму № 4 — 3,45 мм. Ширину зоны усталостного роста трещины приравнивают к критической длине трещины. Следовательно, при оптимальном режиме облучения поверхности силумина пучком электронов удастся увеличить критическую длину трещины более чем в три раза, увеличивая тем самым ресурс работоспособности материала.

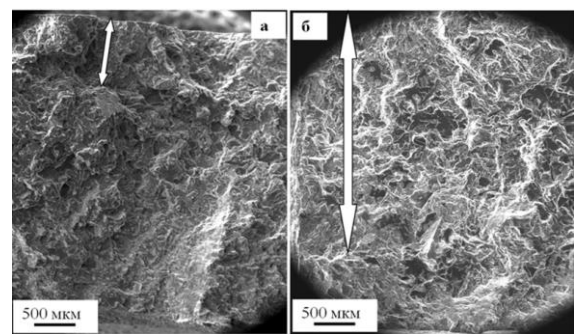


Рис. 3. Структура поверхности разрушения образцов силумина, подвергнутых облучению электронным пучком; а — режим облучения №2; б — режим облучения №4. Стрелками указана зона усталостного роста трещины.

По величине отношения площади чисто усталостной зоны к площади зоны, занятой доломом, можно ориентировочно судить о значении коэффициента безопасности данного материала [1]: чем меньше это отношение, тем ниже коэффициент безопасности при одной и той же величине нагрузки усталостных испытаний. Анализ фрактотграмм исследуемого материала показал, что значение данного коэффициента изменяется от 0.24 (режим № 2) до 0.86 (режим № 4). Следовательно, облучение силумина при оптимальном режиме существенно повышает коэффициент безопасности эксплуатации материала.

К важным признакам усталостной зоны разрушения материала относятся усталостные бороздки [6], которые являются следом перемещающейся трещины на один шаг за каждый цикл нагружения (рис. 4). При прочих равных условиях, связанных с организацией эксперимента усталостного нагружения, расстояние между бороздками будет определяться способностью материала сопротивляться распространению усталостной трещины: чем меньше расстояние между бороздками, тем большей сопротивляемостью распространению трещины обладает материал. Проведенные исследования показали, что среднее расстояние между усталостными бороздками в образце силумина, разрушенном после облучения

по режиму № 2 в среднем равно 0.95 мкм, а в образце, разрушенном после облучения по режиму № 4 – 0.28 мкм. Следовательно, шаг трещины за один цикл усталостного нагружения в образце силумина, обработанном по оптимальному режиму, в 3.5 раза меньше, следовательно, данный образец обладает более высокой сопротивляемостью распространению усталостной трещины.

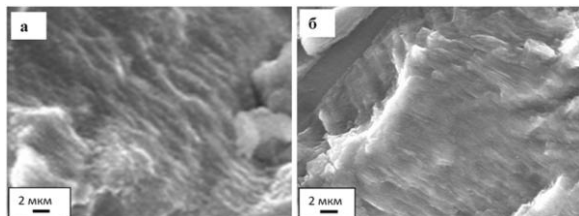


Рис. 4. Усталостные бороздки, формирующиеся в силумине в результате усталостного разрушения; а, б – образцы, разрушенные после облучения по режимам №2 и №4 соответственно.

Заключение

Таким образом, анализ поверхности силумина, облученного высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, показал, что высокоскоростное плавление и последующая кристаллизация поверхностного слоя с образованием структуры ячеистого типа с распределенными по границам ячеек прослойками избыточного кремния позволяет повысить усталостную долговечность эвтектического силумина в среднем более чем в 3.5

раза по отношению к исходному состоянию. Основными причинами увеличения усталостной долговечности силумина являются: формирование субмикро- и наноразмерной структуры, значительное увеличение критической длины трещины, повышение коэффициента безопасности, снижение среднего расстояния между усталостными бороздками.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (проект МД-2920.2015.8) и государственного задания № 3.1496.2014/К.

Список литературы

1. Фрактография и атлас фрактограмм / Под ред. Дж. Феллоуза. М.: Металлургия, 1982. 490 с.
2. Гиржон В.В., Танцюра И.В., Волчок И.П., Широкобокова Н.В. // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 1. С. 50-54.
3. Иванов Ю.Ф., Алсараева К.В., Громов В.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Ткаченко А.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т 11. №3. С. 281-284.
4. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Гришунин В.А., Райков С.В., Коновалов С.В. // Успехи физики металлов. 2013. Т 14. № 1. С. 67 – 80.
5. Иванова В.С., Шаняевский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металлургия, 1988. 400 с.
6. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002. 248 с.

INFLUENCE OF ELECTRON-BEAM TREATMENT ON THE FATIGUE LIFE OF Al-Si ALLOY

K.V. Alsaraeva, V.E. Gromov, S.V. Konovalov

¹⁾ Siberian State Industrial University, Kirov str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia,
gromov@physics.sibsiu.ru, alsaraeva_kv@physics.sibsiu.ru, konovalov@physics.sibsiu.ru

Surface modification of Al-Si alloy by high intensity pulsed electron beam has been done and the multicycle fatigue tests have been carried out. The aim of this work is to analyze the regularities of structure modification of Al-Si alloy by high-intensity pulsed electron beam, to identify the mechanisms responsible for Al-Si alloy failure subjected to multicycle fatigue tests. Investigations of structure and surface modified layer destruction of Al-Si alloy subjected to high-cycle fatigue tests to fracture have been carried out by methods of scanning electron microscopy.

The fatigue tests carried out by us have revealed a wide set of results and essentially depend on both the specimen structure and regime of its irradiation. On the irradiation surface of specimen showing the maximum fatigue life in tests the homogeneous structure of the grain (cellular) type (the grains size of the eutectic ranges from 30 to 50 μm) is formed. Grains are separated by silicon interlayers the transverse sizes of which do not exceed 20 μm. In Al-Si alloy surface irradiation by the electron beam according to the regime 20 J · cm⁻²; 150 μs; 5 pulses the surface layer not less than 20 μm thick melts. High-speed crystallization results in the formation of structure the crystallite sizes of which vary from 100 nm to 250 nm. Stress concentrators that can be sources of specimen failure are not detected on the edge of the fracture. The cracks parallel to the fracture surface are located at some distance from it. It indicates that the concentrator being the cause of the specimen failure was located under the surface, most probably, on the interface of the liquid and solid phases.

The analysis of Al-Si alloy surface irradiated by high-intensity pulsed electron beam has shown that high-speed melting and subsequent surface layer crystallization with the formation of a cellular type structure with distributed interlayers of redundant silicon along the cell boundaries, make possible to increase fatigue life of Al-Si alloy on average by more than 3.5 times relative to the initial state.

The factors responsible for the increase of fatigue life of Al-19.4Si alloy have been revealed and analyzed. It has been shown that the main reasons for Al-Si alloy fatigue life increase are: the formation of submicro- and nanosize structure, the considerable increase of the critical crack length, the safety coefficient, and the reduction of average distance between fatigue striations (cracks for cycle loading).